



# ФИЗИКА PHYSICS

УДК 539.4.015.1; 548.24

DOI 10.18413/2075-4639-2019-51-2-262-269

## ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ДВОЙНИКУЮЩИХ ДИСЛОКАЦИЙ В НОРМАЛИЗОВАННОЙ СТРУКТУРЕ ТИТАНА ВТ 1-0 С ЗЕРЕННОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ (0001)

## BEHAVIORS TWIN DISLOCATIONS IN NORMALIZED STRUCTURE OF VT 1-0 TITANIUM WITH (0001) GRAIN ORIENTATION

Н.В. Камышанченко, В.В. Красильников, А.В. Гальцев, В.А. Беленко  
N.V. Kamyshanchenko, V.V. Krasilnikov, A.V. Galtsev, V.A. Belenko

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85

Belgorod National Research University,  
85 Pobeda St, Belgorod, 308015, Russia

E-mail: kamysh@bsu.edu.ru

### Аннотация

В нормализованной структуре титана ВТ 1-0 с зеренной ориентацией (0001) концентрированным напряжением, создаваемым алмазной пирамидкой под нагрузкой, осуществляется процесс образования двойникующих дислокаций. Вышедшие на поверхность зерна механические двойники, их геометрия, размеры и последовательность образования определялись с помощью приборов акустической эмиссии и другого высокочувствительного оборудования. Полученный статистический материал позволяет сделать ряд важных выводов о природе образования двойников.

### Abstract

There is a formation process of twin dislocations in normalized structure of VT 1-0 titanium by concentrated stress due to a diamond pyramid under a load. The mechanical twins have come to a surface of grain. Their geometry, sizes and sequence of formation are determinated by acoustic emission devices and other highly sensitive equipment. The obtained statistical material allows us to draw a number of important conclusions about the nature of the formation of twins.

**Ключевые слова:** титан, двойники, дислокации, акустическая эмиссия, алмазная пирамидка.

**Keywords:** titanium, twins, dislocations, acoustic emission, diamond pyramid.

### Введение

Интерес к исследованию технически чистого титана вызван его особыми свойствами, благодаря которым титан нашел широкое применение в изделиях различного назначения [Капырин, 1977].

Целый ряд физико-механических свойств (прочность, усталость, твердость, ползучесть, химическая активность и др.) находятся в зависимости от температуры эксплуатации [Титан, 1983].



Титан хорошо обрабатывается давлением, прокаткой в горячем состоянии и удовлетворительно в холодном, что делает изготовление деталей технически и технологически рациональным [Honeycombe, 1971].

Несмотря на достигнутые успехи в понимании влияния процесса эволюции структуры на физико-механические и другие свойства чистого металла, получение устойчивой структуры остается проблемой для многих отраслей промышленности [Zwicker, 1974, ASM International 9, 2004].

В данной работе приведены результаты исследования влияния состояния структуры на процесс двойникования в отожженных образцах в зеренной ориентации (0001).

### Метод исследования

Подготовка образцов [Камышанченко, МиТОМ, 2010], технология проведения эксперимента [Камышанченко, Научные ведомости БелГУ, 2010] контролировалась и анализировалась [Adams, 1993; Камышанченко, 2016] при помощи высокочувствительных приборов и оборудования. Зернограничное расположение в образцах определялось с помощью автоматизированного анализа картин дифракции, сформированных обратно рассеянными электронами EBSD анализа на растровом электронном микроскопе с использованием программного обеспечения «OIM Analysis 5.2» [Kamyshanchenko, 2017, Frank, 1951].

Исследования проводились в зернах с ориентацией (0001), подверженных концентрированному напряжению, создаваемому нагружением на алмазную пирамидку.

### Результаты и анализ экспериментальных исследований

#### *Эксперимент № 1*

В зернах с ориентацией (0001) при помощи микротвердомера «ДМ-8В» осуществлялось индентирование с нагрузкой 50 г с выдержкой под нагрузкой 15 с. Расстояния между отпечатками не превышали 100 мкм (Рисунок 1).

Установлено, что в процессе погружения пирамидки в зерна активность и интенсивность акустических сигналов различна (Рис. 1: а), б), в)).

После снятия нагрузки было обнаружено на поверхности зерна различное количество механических двойников. Отпечатки отличаются друг от друга временем погружения пирамидки до полной остановки ее в теле зерна (на Рисунке 1 а) соответствует процессу погружения длительностью 0,037 с, б) – 0,025 с, в) – 0,045 с). Кроме того, отпечатки имеют различную глубину погружения пирамидки, различное количество механических двойников с различными геометрическими размерами (табл. 1).

Разнообразие вариантов взаимодействия двойникующих дислокаций с дефектами структуры, непредсказуемость поведения двойникующих границ и определяющее влияние структурных неоднородностей на динамические и геометрические характеристики двойников даже в нормализованном отжиге состоянии структуры титана делает процесс неуправляемым и непредсказуемым.

Физическая сущность процесса двойникования может быть описана на основании дислокационной теории (см. [Косевич, 1971]).

В зоне деформации отпечатка образуются некомпенсированные поля упругих напряжений. Величина образовавшегося локализованного напряжения  $\tau$  может быть оценена по формуле [Старцев, 1963]:

$$\tau = \frac{N}{L} \cdot \frac{Gb}{\pi}, \quad (1)$$

где  $N$  – число дислокаций в скоплении;  $L$  – длина цепочки двойникующих дислокаций;  $G$  – модуль сдвига;  $b$  – вектор Бюргерса двойникующей дислокации.

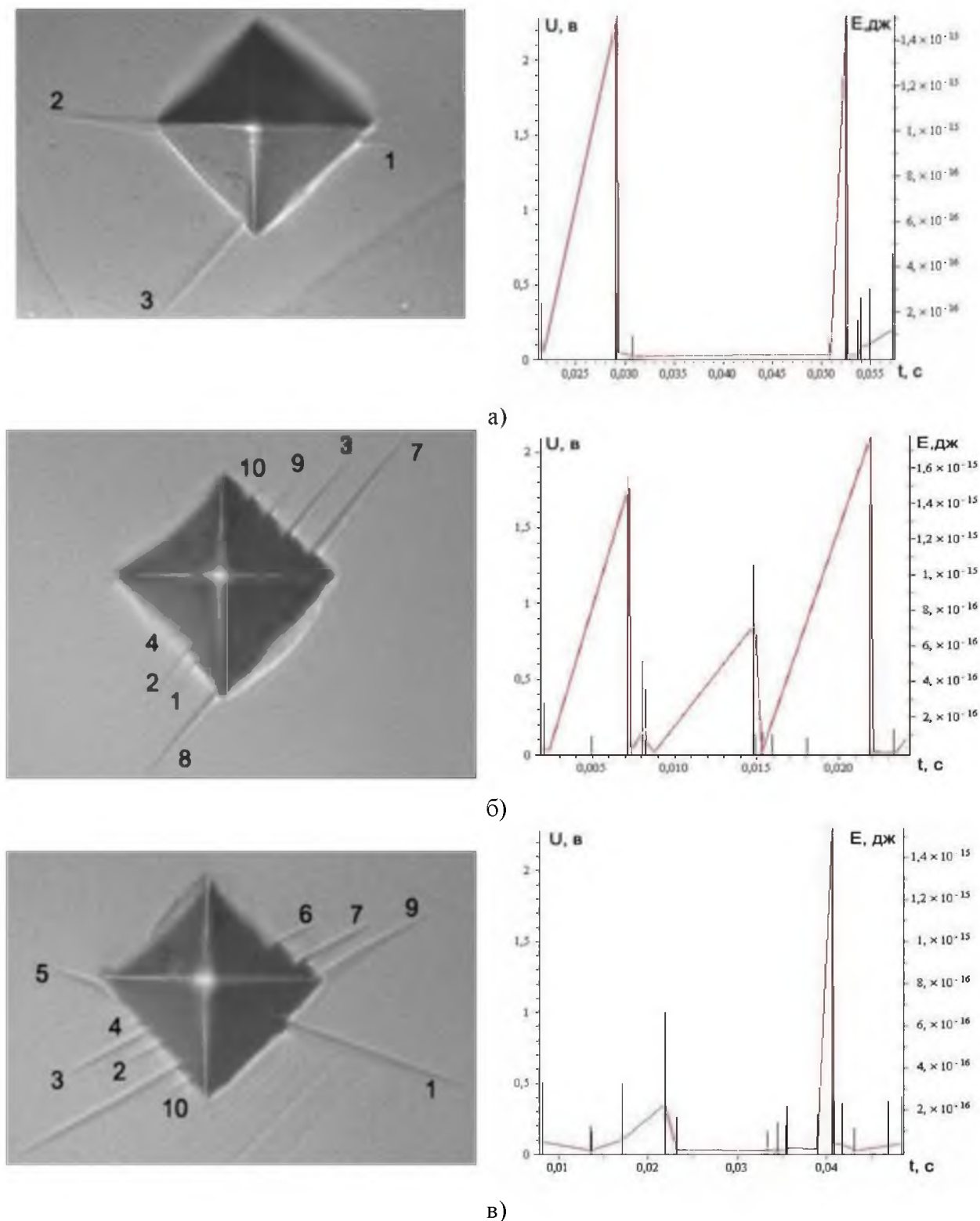


Рис. 1. Расположение отпечатков пирамидки на материнском участке поверхности и двойников вокруг отпечатков, соответственно а), б), в), образованных в результате воздействия нагрузки на индентор в 50 г. (x 1500). Справа от фотографии отпечатков представлены графики акустической эмиссии (АЭ)

Fig. 1. The location of the pyramid prints on the parent area of the surface and the twins around the prints, respectively a), b), c), formed as a result of the impact of the load on the indenter of 50 g (x 1500). To the right of the print photo there are graphs of acoustic emission (AE)



Таблица 1  
Table 1

**Параметры двойников и размеры отпечатков, образованных под действием нагружения на алмазную пирамидку. (Надо сказать, что в таблице двойники пронумерованы)**

**Parameters of doubles and the sizes of the prints formed under the influence of loading on a diamond pyramid. (It is necessary to tell that in the table doubles are numbered)**

№ ячейки	Нагрузка, г.	Кол-во двойников	Линейные размеры механического двойника, мкм										Величина диагонали отпечатка, мкм	Глубина погружения пирамидки, мкм	Время погружения, с.
			Номера двойников, показанных на Рисунке 1												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
№ 1	10	0											9,3	1,878	0,037
	25	2	2,8	9									16,6	3,35	
	50	3	4,2	13,7	16,1								26,27	5,308	
№ 2	10	4	4,1	4,0	4,57	4,1							10,83	2,188	0,025
	25	6	8,4	3,2	4,3	13,6	4,2	4,4					17,7	3,576	
	50	8	8,4	3,2	12,0	1,2	-	-	17,7	13,6	4,5	1,5	25,92	5,236	
№ 3	10	3	7,4	6,5	4,6								10,5	2,121	0,045
	25	8	15,5	6,4	12,0	4,1	4,0	8,8	9,8	7,5			18,08	3,652	
	50	10	23,2	4,4	11,4	1,5	7,8	5,8	10,0	23,1	14,5	3,1	25,97	5,246	

В результате сжатия дислокационного ансамбля силы упругого взаимодействия в вершине двойника превышают энергетический барьер, препятствующий перемещению дислокаций. Происходит макроскопически заметное изменение длины двойника – скачок вершины. Образующаяся форма дефекта соответствует клину. Равновесие клиновидных двойниковых прослоек под нагрузкой можно описать уравнением:

$$F_{\text{упр}} + F_{\text{неупр}} + F_{\text{лок}} = 0, \quad (2)$$

где  $F_{\text{упр}}$  – силы, созданные внешней нагрузкой и полями дислокаций ансамбля;  $F_{\text{неупр}}$  – силы торможения, образованные структурой кристалла и наличием дефектов;  $F_{\text{лок}}$  характеризует силы, действующие со стороны суммарного поля упругих напряжений на двойникоующие дислокации ансамбля.

Процессы двойникования и выход механических двойников в зернах происходят на разных глубинах проникновения индентора, что влияет на характеристики заклинившегося двойника.

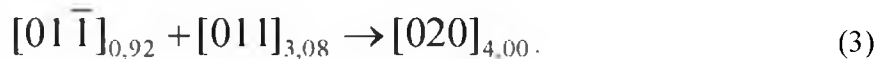
Двойниковый зародыш может образовываться, когда величина внешней силы, действующая на источник дислокаций, превышает суммарную силу противодействия двойникоующей дислокации, включающую в себя силу трения и силу поверхностного натяжения. Для образования механического двойника необходимо преодолеть и силы от других случайных факторов, которые меняются от одного зерна к другому в том же образце [Hirth, 1971].

Рисунок 1 показывает, что иногда наблюдается непропорционально резкое увеличение размеров отдельных двойников. При этом, очевидно, упругий двойник встретился с внутренним концентратором напряжений, резко увеличивающим сдвиговые напряжения в плоскости двойникования, в результате чего совместным усилием с внешним напряжением создаются условия для активизации двойниковых процессов в дислокационной области. Об этом, в частности, свидетельствуют сигналы АЭ, когда выброс энергии в джоулях превышает среднее значение на два порядка.



В противоположность величине энергии, востребованной для образования механического двойника, для процесса скольжения требуется существенно меньше энергии, так как скольжение является результатом малых смещений решетки исследуемого металла. Об этом также свидетельствуют полученные сигналы АЭ. Величины этих смещений в различных зернах существенно отличаются друг от друга, что связано, очевидно, с разной плотностью дефектов (препятствий) на разных глубинах проникновения пирамидки внутри объема зерна.

Сопутствующий скольжению процесс может быть обеспечен механизмом появления двойниковых зародышей на скоплениях полных дислокаций по дислокационной реакции, представленной в кристалле с ГПУ – структурой на примере висмута [Косевич, 1971]:



Если вступающие в реакции дислокации лежат в плоскости базиса (111) и плоскости ( $\bar{1}11$ ), то эта реакция в висмуте может служить источником двойникующих дислокаций, поскольку суммарная дислокация будет иметь плоскость скольжения, совпадающую с плоскостью двойникования (101), а ее вектор Бюргерса будет совпадать по направлению с направлением сдвига при двойниковании [010]. Такой процесс хорошо выполняется при сосредоточенной нагрузке.

#### *Эксперимент 2.*

Концентрация напряжений  $\alpha$ , следовательно, и запасенная вокруг пирамидки упругая деформация не влияет на геометрию двойникующей дислокации, и ее длина лимитируется не мощностью концентратора напряжений или способностью дислокационного источника генерировать определенное число двойникующих дислокаций, а чем-то другим, и в первую очередь, структурой кристаллической решетки.

Данные предыдущего эксперимента показали, что источники двойникующих дислокаций в разных местах действия пирамидки при одной и той же ориентации кристаллической решетки в материнском кристалле отличаются активностью и мощностью развития АЭ (Рис. 1). Очевидно, активность источника двойникующих дислокаций подавляется напряжениями других препятствий.

Установлено отсутствие жесткой связи между размерами отпечатка, количеством и величиной образовавшихся механических двойников вокруг отпечатка и их размерами (табл. 1).

Все двойники вокруг отпечатков имели клиновидную форму с уменьшением от устья к вершине, их толщины и угла наклона (Рис. 2).

Величина сигналов АЭ и их число с проникновением индентора в материнскую структуру зерен возрастает до 0,1–0,2 В. Очевидно, что эти сигналы являются результатом развития процесса скольжения.

С учетом общепринятой терминологии [Бойко, 1991], двойникующие дислокации в моделях представляют собою краевые дислокации и двойникующий клин, в частном случае, представляет собою фигуру сложной конструкции (Рис. 2).

Независимо от схемы образования двойниковой среды, структуры кристалла и напряжения, механизмы двойникования характеризуются общими закономерностями: неравномерностью, непропорциональностью, несинхронностью, неоднозначностью размеров двойниковой области с ростом нагрузки, отсутствием однозначного соответствия между величиной напряжения, создаваемого внешней нагрузкой, размерами и формами двойника.

#### *Эксперимент № 3.*

При взаимодействии двойникующих и полных дислокаций, расположенных в объеме кристалла, образуются новые виды дефектов кристаллической решетки: вакансии, пороги, перегибы, которые могут, в свою очередь, взаимодействовать с полными дислокациями. В результате взаимодействия со стопорами движущиеся дислокации

теряют свою энергию в процессе дислокационных реакций, приводящих к исключению двойникующих дислокаций из процесса двойникового. В нескомпенсированных реакциях дислокационных процессов в кристалле происходит образование напряженного состояния в структуре кристаллического строения, которое хорошо проявляется в результате химического травления.

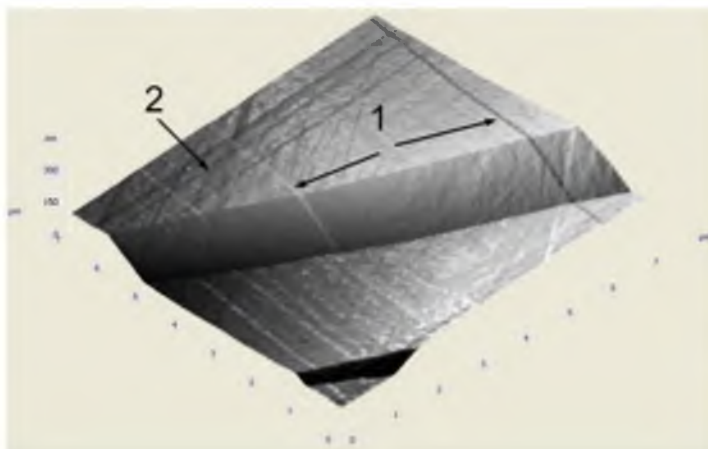


Рис. 2. СЗМ – изображение клиновидного упругого двойника, полученного в результате микроиндентирования. Стрелками 1 показаны полосы скольжения, 2 – аккомодационные полосы  
Fig. 2. The SPM image of a wedge-shaped elastic twin obtained as a result of microindentation. Arrows 1 show slip bands, 2 – accommodation bands

Состояние поверхности зерна титана в зоне двойникового после травления характеризуется следующими особенностями (Рис. 3): на границе двойника и базисной плоскости за двойником имеется глубоко протравленная область, где трудно определить выходы отдельных дислокаций.

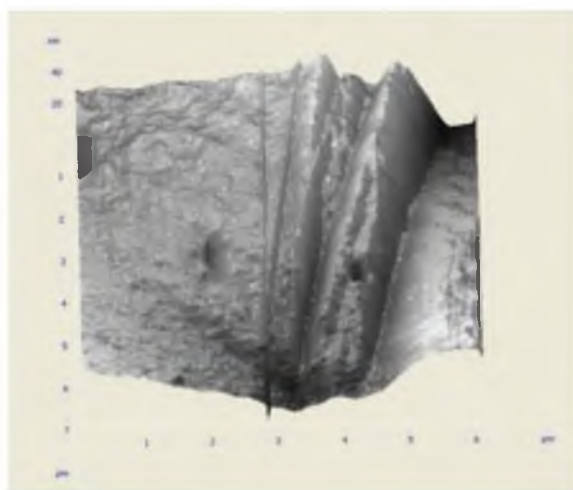


Рис. 3. Вид поверхности образца в зоне механического двойника после травления  
Fig. 3. View of the surface of the sample in the area of the mechanical twin after etching

Протравленная область простирается от устья до вершины двойника.

Известно, что распространению двойниковой прослойки предшествует скольжение в материнской части образца и в зоне двойниковой прослойки. Скопления двойникующих дислокаций на границе создаются на определенной глубине под поверхностью кристалла сконцентрированным напряжением, приводящим к проявлению упругих свойств двойниковых границ и интенсивному протеканию скольжения [Бойко, 1991]. В результате плотность леса дислокаций возрастает на несколько порядков по сравнению со средним значением. Дислокации, осуществляющие скольжение, останавливаются на границе



двойнивающей структуры и параллельных плоскостях (0001), вызывая изменение рельефа за границей двойниковой перестройки.

В этой узкой части материнской области наблюдаются растравленные полосы, что позволяет утверждать о наличии здесь повышенного напряжения. Перед границей двойниковой структуры сохраняется узкая область с материнской структурой, которая не была подвергнута пластической деформации скольжением, и поэтому не отмечена протравленностью.

### Выводы

1. Примененный теоретически обоснованный способ нормализации структуры титана ВТ 1-0 имеет достаточное количество неравномерно распределенных дефектов в объеме зерна, что влияет на образование клиновидных двойников при одной и той же зеренной ориентации.

2. Наличие структурных неоднородностей в объеме зерна влияет на динамические, геометрические и количественные характеристики механических двойников и не позволяет предсказать время и место появления двойника.

3. Акустическая эмиссия позволяет определить наличие процессов скольжения, энергетические параметры которых существенно отличаются от энергии образования механических двойников.

4. Состояние поверхности зерна в зоне выхода механического двойника после химического травления характеризуется наличием протравленных областей на границе двойника и в базисной плоскости за двойником, что позволяет утверждать о наличии в этих областях поверхности зерна повышенных напряжений.

5. Состояние зеренной поверхности образцов из титана ВТ 1-0 зависит от структуры в объеме кристалла, величины и направления внешнего напряжения, вызывающего образование механических двойников и влияющего на их геометрию и количество.

### Список литературы References

1. Бойко В.С., Гарбер Р.И., Косевич А.М. 1991. Обратимая пластичность кристаллов. М., Наука, 278.

Boiko V.S., Garber R.I., Kosevich A.M. 1991. Obratimaya plastichnost' kristallov [Reversible plasticity of crystals]. M., Nauka Publ, 278.

2. Камышанченко Н.В., Гальцев А.В., Беленко В.А. и др. 2016. Влияние отклонения направления приложенного напряжения по отношению к оси Z базовой плоскости Ti на процесс двойникования. Материалы VIII Международной конференции «MPFP-2016», с. 123–132.

Kamyshanchenko N.V., Gal'tsev A.V., Belenko V.A. and et al. 2016. Vliyanie otkloneniya napravleniya prilozhennogo napryazheniya po otnosheniyu k osi Z bazovoi ploakosti Ti na protsess dvoinikovaniya [The influence of the deviation of the direction of the applied voltage with respect to the Z axis of the base plane Ti on the twinning process]. Materialy VIII mezhdunarodnoi konferentsii "MPFP-2016", p. 123–132.

3. Камышанченко Н.В., Никулин И.С., Кузнецов Д.Н. и др. 2010. Закономерности изменения микротвердости технически чистого титана, подвергнутого различному механико-термическому воздействию. НАУЧНЫЕ ВЕДОМОСТИ БелГУ. Серия Математика. Физика. № 11(82). Вып. 19, с. 78–87.

N.V. Kamyshanchenko, I.S. Nikulin, D.P. Kuznetsov and et al. 2010. Some Regularities Of The Microhardness Varying In Cp-Titanium Under Various Mechanical And Thermal Stresses [Regularities of change in microhardness of technically pure titanium subjected to various mechanical and thermal effects]. NAUCHNYE VEDOMOSTI BelGU. Seriya: Matematika. Fizika. № 11(82). Vyp. 19, p. 78–87.

4. Камышанченко Н.В., Никулин И.С., Кунгурцев М.С. и др. 2010. О двойниковании титана ВТ1-0 после полного отжига. Митом, № 8, с. 25–29.

Kamyshanchenko N.V., Nikulin I.S., Kungurtsev M.S. and et al. 2010. O dvoinikovanii titana VT1-0 posle otzhiga [About twinning titanium BTI-0 after complete annealing]. MitOM, № 8, с. 25–29.





5. Капырин Г.И. 1977. Титановые сплавы в машиностроении. Л., Машиностроение, 247.  
Kapyrin G.I. 1977. Titanovye splavy v mashinostroenii [+англоязычный вариант]. L., Mashinostroenie, 247.
6. Косевич А.М., Бойко В.С. 1971. Дислокационная теория упругого двойникования кристалла. Успехи физических наук, т. 104, вып. 2. С. 202–254.  
Kosevich A.M., Boiko V.S. 1971. Dislokatsionnaya teoriya uprugogo dvoynikovaniya kristalla [Dislocation theory of elastic twinning of a crystal]. Uspekhi fizicheskikh nauk, v. 104, vyp. 2. p. 202–254.
7. Старцев В.И., Бенгус В.З., Комник С.Н., Лаврентьев Ф.Ф. 1963. Взаимодействие дислокаций при двойниковании кристаллов. Кристаллография, т. 8, № 4, с. 632–640.  
Startsev V.I., Bengus V.S., Komnik S.N., Lavrent'ev F.F. 1963. Vzaimodeistvie dislokatsyi pri dvoynikovanii kristallov [The interaction of dislocations in the twinning of crystals]. Crystallography, v. 8, N. 4, p. 632–640.
8. Титан: свойства, сырьевая база, физико-химические основы и способы получения. Изд. Металлургия, 1983.  
Titan: svoistva, syr'evaya baza, fiziko-khimicheskiye osnovy I sposoby polucheniya [Titanium: properties, raw material base, physical and chemical bases and methods of obtaining]. Izd. Metallurgiya, 1983.
9. Adams B.L., Wright S.I., Kunze K. 1993. Met Trans, A. 24, 819.
10. ASM International, 2004–2773 p., Editor: George Vander Voort.
11. Frank F.C. 1951. Crystal dislocation – elementary concepts and difinitions. Plil. Mag. v. 42, № 326, p. 809–819.
12. Kamyshanchenko N., Gal'tsev A., Belenko V. и др. Dependence of twinning development in  $\alpha$ -Ti misorientation angle. Jornal of Fundamental and Applied Sciences., ISSN 1112-9867, p. 1258–1268.
13. The plastic deformation of metals. R.W.K. Honeycombe. RuMoRGB.
14. Theory of dislocations. John Price Hirth, Jens Lothe RuMoRGB.
15. Zwicker Ulrich. Titan und Titanlegierungen. Berlin etc., 1974.

#### Ссылка для цитирования статьи

#### Reference to article

Камышанченко Н.В., Красильников В.В., Гальцев А.В., Беленко В.А. 2019. Особенности поведения двойникующих дислокаций в нормализованной структуре титана ВТ 1-0 с зеренной ориентацией (0001). Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Математика. Физика. 51 (2): 262–269. Doi: 10.18413/2075-4639-2019-51-2-262-269.

Kamyshanchenko N.V., Krasilnikov V.V., Galtsev A.V., Belenko B.A. 2019. Behaviors twin dislocations in Normalized structure of VT 1-0 titanium with (0001) grain orientation. Belgorod State University Scientific Bulletin. Mathematics. Physics. 51 (2): 262–269 (in Russian). Doi: 10.18413/2075-4639-2019-51-2-262-269.